

Выбор важных свойств бесвинцовых припоев

Горячность противников перехода на бесвинцовые припои — один из признаков того, что это одно из самых губительных изменений, произошедших в сфере монтажа электронных компонентов. Губительность этого новшества заключается в том, что оно вносит глубокие изменения в процесс формирования соединений между компонентами. До тех пор, пока компоненты не объединены в функциональный узел межсоединениями, они являются не более чем набором элементов, которые сами по себе не несут никакой функциональной нагрузки. В большинстве случаев материал, обеспечивающий электрический контакт, служит и для механического соединения. Поэтому он должен выдерживать действие механических напряжений и деформации, возникающие при взаимодействии с внешней средой. Авторы обозначают свойства, которые считают важными для бесвинцовых припоев, а также приводят результаты экспериментов с используемыми или подходящими для коммерческого производства припоями.

Кейт Свитмен
(Keith Sweatman)

Тетсуо Нишимура
(Tetsuro Nishimura)

Перевод: Валерий Русанов
rusanov.valery@gmail.com

В настоящее время пайка волной припоя — хорошо освоенный процесс, и он даже считается низкотехнологичным. Но для его успешного внедрения потребовался новый, более серьезный взгляд на процесс пайки и факторы, которые на него влияют. Это было вызвано тем, что при групповой пайке было невозможно, как раньше, обеспечить индивидуальный контроль качества каждого межсоединения. И чтобы принести несомненную экономическую выгоду, данный процесс должен был обеспечить приемлемое качество. То есть за те несколько секунд, в течение которых места для пайки находятся в контакте с расплавленным припоем, на них должны быть получены галтели правильной формы, а электросоединение должно быть надежным. Несомненно, что если необходимо наличие дополнительного персонала для исправления пайки на плате, можно говорить о неоправданности применения этой технологии. Таким образом, именно внедрение технологии пайки волной припоя изменило подход индустрии монтажа электронных компонентов к процессу пайки. Этот процесс стали использовать как технологию, базирующуюся на научном подходе.

Ответом на такой вызов стало создание представления о паяемости. Паяемость высока, если поверхности, подлежащие соединению, легко могут быть смочены расплавленным припоем. Этот параметр важен при любых процессах пайки, особенно в условиях перехода электронной промышленности к бесвинцовым технологиям. Были разработаны паяемые покрытия выводов элементов и контактных площадок печатных плат, высокоэффективные и не обладающие коррозионным эффектом флюсы, установки для пайки волной припоя с системой подогрева, а также с использованием динамической волны. Это позволило облегчить процесс формирования соединений и прийти к оптимальным показателям качества.

Вехой в процессе совершенствования технологии стал переход от припоев, состоящих из 60% олова

и 40% свинца, к эвтектическим припоям с соотношением 63/37 соответственно. Таким образом, изначально довольно узкоспециализированный металлургический термин «эвтектический» стали употреблять и технологи электронной отрасли. Массовое производство электроники, ставшее возможным благодаря использованию волны припоя, оказалось катализатором процесса создания новых методов пайки, таких как пайка оплавлением. Когда повышение плотности расположения элементов на плате и усложнение схем создали предпосылки для создания технологии поверхностного монтажа, для освоения нового метода необходимы были общие усилия представителей электронной отрасли. Взаимодействие, налаженное ранее, сейчас помогает справиться со сложностями, возникающими при переходе к бесвинцовым технологиям. Внедрение новых припоев и паяльных паст привело к изменению основных параметров процесса — вязкости, тиксотропности, смачиваемости, а также технологического интервала (возможность получения положительных результатов в широком интервале изменения параметров процесса). О качестве специализированного оборудования стали судить по температуре, которую могли обеспечить печи оплавления припоя.

Все перечисленные изменения были спровоцированы исключительно техническими и экономическими решениями. Первым регламентирующим документом, принятым из соображений заботы об окружающей среде, стал Монреальский протокол. До этого эффективный процесс отмычки позволял использовать высокоактивные флюсы, обеспечивавшие широкий технологический интервал. Такая качественная отмычка была возможна благодаря большой способности к растворению хлоро-фтористых гидрокарбонатов, от которых пришлось отказаться. В качестве ответа были созданы технологии отмычки, приближающиеся по эффективности к фреоновым растворителям. Но это не было первоочередной задачей: необходимо было увеличить паяемость кон-

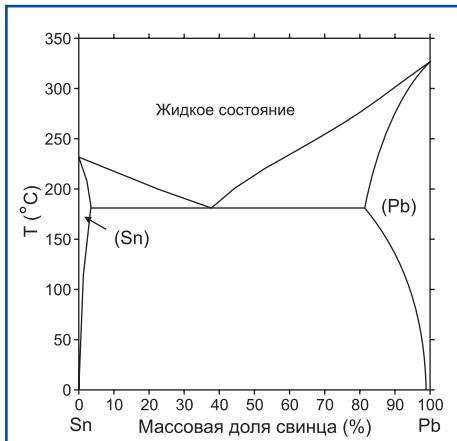


Рис. 1. Оловянно-свинцовый припой в качестве эталона для бессвинцовых припоев

тактных площадок, чтобы надежная пайка была возможна с минимальными и неопасными остатками, и не было нужды в отмывке. При всем этом следовало убедиться, что вышеупомянутые изменения не затронули металлургию припоев, используемых при монтаже элементов на ПП, которая базировалась на основе оловянно-свинцовых припоев с содержанием свинца не менее 36% (рис. 1).

Некоторые преимущества были получены при резком поднятии линии солидуса на насыщенный свинцом составе сплава: результатом стало получение высокотемпературных припоев, используемых при производстве компонентов. Введение в состав припоя серебра или меди (до 2%) позволило лучше противостоять эрозии металлизации печатных плат и устройств для пайки, а также увеличить прочность соединения за счет внедрения интерметаллидов в микроструктуру. Так или иначе, свойства припоя определялись тем, что в сплав входило 2 металлических фазы: олово с примерно 2% свинца в расплаве и свинец с 20% олова. В эвтектических припоях эти 2 металлические фазы присутствовали в виде тонкой пластинчатой структуры с перемежающимися слоями.

Практическое сравнение бессвинцовых и оловянно-свинцовых припоев

Так как оловянно-свинцовый припой был признан лучшим сплавом для пайки электронных узлов, а также из-за того, что принципы конструирования электронных устройств и процесс монтажа компонентов создавались

с учетом ограничений, обусловленных его свойствами, именно с ним и нужно сравнивать бессвинцовые припои, чтобы сформировать объективное представление об их преимуществах и недостатках. Однако из-за того, что оловянно-свинцовые припои постоянно применялись при технологии монтажа элементов на печатные платы, им не было альтернативы, и их свойства досконально не изучены, даже теми, кто сейчас так увлеченно ратует за продолжение их использования. Единственное сходство содержащих свинец и бессвинцовых припоев — это то, что их основной компонент — олово, и то, что их предназначение — обеспечивать металлургическое соединение компонентов с основанием, реагируя с металлизацией основания для формирования интерметаллической структуры. Различий в их металлургии гораздо больше, чем сходств.

Свойства припоев

Свойства припоя можно разделить на 2 категории: те, что влияют на его характеристики при пайке, и те, что влияют на надежность паяных соединений при эксплуатации. К первой категории относятся температура плавления, смачивающие свойства, текучесть, агрессивность по отношению к меди и паяльному оборудованию, а также стабильность в расплавленном состоянии. Ко второй категории отнесем прочность и пластичность, ударную вязкость, тип и стабильность микроструктуры, скорость роста интерметаллидов и надежность.

Когда начиналось освоение бессвинцовых припоев, главной задачей было как можно ближе подвести их температуру плавления к показателю для сплава 63% олова и 37% свинца. Впоследствии было доказано, что при использовании бессвинцовых припоев допустим меньший перегрев, чем при использовании припоев с содержанием свинца (перегрев — граница, до которой температура процесса превышает температуру плавления). Чтобы довести место пайки до температуры, необходимой для смачивания, при использовании оловянно-свинцовых припоев нужен значительный перегрев. Такого же эффекта можно достичь при использовании предварительного нагрева. Температура, при которой происходит соединение, примерно одинакова для обоих типов припоев. Вероятно, это связано с тем, что в обоих случаях происходит похожая реакция смачивания. Соединение достигает металлур-

гического единства, когда олово, содержащееся в припое, вступает в реакцию с металлом основания для формирования интерметаллидов на границе соприкосновения.

Итак, можно сделать вывод, что сплав не должен быть исключен из рассмотрения из-за того, что его температура плавления выше, если она не больше максимально допустимой температуры для компонентов и материалов платы. В таком случае сплав может быть применен, если у него есть какие-либо особые полезные свойства. Обычный тест на смачиваемость может создать обманчивое впечатление, что время, необходимое для смачивания, состоит из времени, нужного, чтобы нагреть образец до температуры плавления, и из времени, затрачиваемого на полное смачивание поверхности контакта. Тем не менее, сплав с более высокой температурой плавления может смачивать быстрее, чем сплав с более низкой. Это хорошо видно на рис. 2: припой SnCuNiGe более тугоплавкий, но скорость смачивания у него больше, чем у более легкоплавкого припоя SnAgCu. Практически разница в температурах плавления может быть нивелирована с помощью дополнительного подогрева. Скорость смачивания является более важным параметром.

Основой любого процесса пайки является затекание припоя в зазор. Этот процесс базируется на капиллярном эффекте, появляющемся при смачивании соединяемых поверхностей, при этом важно и такое свойство расплавленного металла, как текучесть. К примеру, если при пайке волной излишки припоя будут оставаться в месте соединения, может образоваться перемычка. Для измерения текучести припоя полезным оказался метод, разработанный в металлургии. Схема установки для измерения текучести приведена на рис. 3.

Важность этой характеристики можно оценить, вспомнив, что, когда повысилась сложность процессов пайки, электронная промышленность стала применять эвтектические припои, обладающие максимальной текучестью по сравнению с любыми другими оловянно-свинцовыми. Тестирование бессвинцовых припоев на текучесть, проведенное при температуре на 40 °C больше ликвидуса, показывает, что эта их характеристика может быть как близкой к эвтектике, так и быть хуже на 30%. Одной из проблем, неожиданно возникших в первые годы применения бессвинцовых технологий, оказалась эрозия медных контактных площадок. Этот

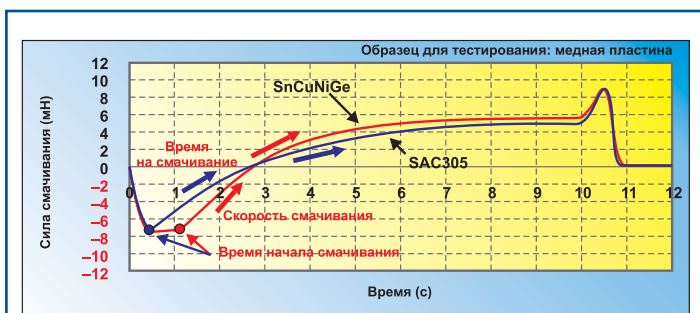


Рис. 2. Показатели смачивания двух бессвинцовых припоев

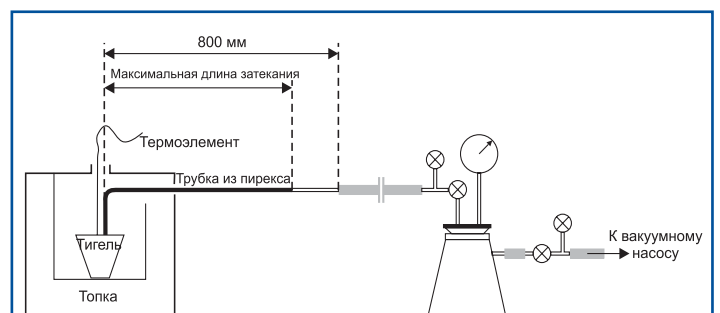


Рис. 3. Схема установки для измерения текучести припоев

процесс представлен на рис. 4. Поток припоя проходит слева направо. Расплавленное олово весьма агрессивно к большинству металлов и достаточно быстро разрушает их. В эвтектических припоях эта проблема не проявляется, потому что агрессивность олова значительно снижается, если в сплаве с ним присутствует свинец. Без такого сдерживающего фактора эрозия при использовании бессвинцовых припоев может привести к нарушению связи между медной фольгой на печатной плате и паяным соединением. Среди бессвинцовых припоев наблюдаются серьезные различия в скоростях, с которыми они разъедают медь.

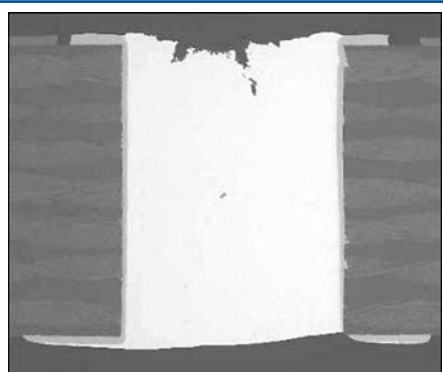


Рис. 4. Эрозия медной металлизации сквозного отверстия бессвинцовым припоем

Вероятно, из-за взаимодействия оксида серебра с оксидами никеля и хрома, делающего нержавеющую сталь коррозионно-стойкой, бессвинцовые серебросодержащие припои разрушают паяльное оборудование, даже если содержание серебра в них небольшое. Эта тенденция усиливается фосфором, который обычно добавляется в серебросодержащие бессвинцовые припои, чтобы уменьшить коэффициент зашлакованности таких сплавов. Волнообразователь (рис. 5) достиг показанной на рисунке степени разрушения менее чем за год обычного применения при использовании SAC-припоя с малым содержанием серебра. Проблема эрозии может быть отчасти решена при производстве оборудования с помощью специальных материалов, особых покрытий или поверхностной обработки. Но эти меры удорожают конструкцию, и их нельзя применять постоянно. Не повреждают оборудование припои, не содержащие серебро и имеющие в составе специальные добавки, препятствующие образованию шлаков. Новое поколение «микросплавных»

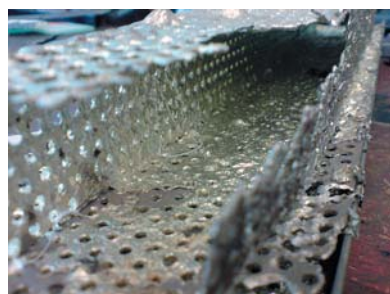


Рис. 5. Эрозия паяльного оборудования при использовании бессвинцовых припоев

припоев, созданное на основе оловянно-свинцовых эвтектических припоев, имеет в составе доли тугоплавких металлов, таких как никель и кобальт. Если необходимо поддерживать стабильное качество пайки с использованием ванны с припоем в течение долгого времени, необходимо не допустить образования тугоплавких интерметаллидов. Но кубические оловянно-кобальтовые сплавы, будучи стабильными при температуре пайки, образуются вне расплава, и поэтому добавление микросплавов не может изменить свойства припоя, как требуется.

О второй категории свойств

Хотя олово и свинец — мягкие в интерметаллических фазах металлы, в бессвинцовых припоях они становятся твердыми. Основываясь на их морфологии и распределении интерметаллидов, можно прийти к выводу, что они могут улучшить предел текучести припоя. Комбинация интерметаллидов в оловянно-серебряно-медных припоях хотя и улучшает прочность, но при этом ухудшает пластичность. Несмотря на то, что во многих случаях прочность является очень важным фактором, связанная с ней хрупкость соединений может привести к проблемам с надежностью, встречающимся при работе с бессвинцовыми припоями. Одно из полезных свойств оловянно-свинцовых припоев — их пластичность, то есть способность разгружать пластические деформации без затвердевания и растрескивания. Перемещения элементов друг относительно друга при монтаже неизбежны. Это объясняется огромным количеством применяемых материалов и их разными температурными коэффициентами расширения. Являясь соединительным материалом, припой должен выдерживать образующиеся при этом нагрузки. Срок службы соединений можно увеличить, передавая подобные нагрузки в усилия на сгибах выводов элементов, при этом у некоторых бессвинцовых припоев предел текучести оказывается более высоким, чем у аналогов. Так или иначе, если припой должен выдерживать подобные напряжения, мгновенное ожесточение пайки может привести к трещинам и нарушению контакта. Не содержащие серебра бессвинцовые припои обладают меньшей прочностью, но их большая пластичность помогает выдерживать нагрузки, возникающие при тепловом сжатии или расширении. Анализ данных о надежности подтверждает преимущества текучих припоев в случаях, когда пайка испытывает большие суммарные нагрузки.

Использование электроники в переносных устройствах увеличило вероятность воздействия на паяные межсоединения ударных нагрузок, возникающих, к примеру, при падении. Испытания соединений типа BGA на высоких скоростях сдвига — около 4000 мм/с — обозначили большие различия между бессвинцовыми припоями в прочности и чувствительности к усилию на разрыв. Тенденция к ломкости SnAgCu-припоев при высоких скоростях сдвига объясняется хрупкостью интерметаллических соединений и высокой интенсивностью деформации на сдвиг основной массы сплава.

В то время как для изучения микроструктуры оловянно-свинцовых сплавов просто не было необходимости, для бессвинцовых припоев, напротив, микроструктура является очень важным фактором, во многом определяющим их свойства при пайке и надежность при эксплуатации. Если единственными добавками в припой являются серебро и (или) медь, кристаллическая решетка почти полностью состоит из олова с добавками, представленными только в виде интерметаллических соединений с оловом — Ag_3Sn и Cu_6Sn_5 . В то время как в оловянно-свинцовых припоях обе составляющие пластичные, мягкие и по свойствам металлические, с многогранной структурой, в бессвинцовых припоях интерметаллиды являются жесткими, хрупкими и неметаллическими по характеристикам. Если сочетание металлов и условия охлаждения способствуют появлению интерметаллидов, они приобретают характерную форму многогранников (рис. 6).

Кристаллы Ag_3Sn принимают форму плоских пластинок (рис. 7), тогда как Cu_6Sn_5 обычно образуются в форме шестигранных призм, которые иногда оказываются полыми. Даже если сплав номинально является эвтектическим (рис. 8), как, например, Sn/3,8Ag/0,7Cu, если его свойства не будут модифицированы добавками, припой при пайке после достижения температуры плавления охладится примерно на 20 °С, прежде чем начнется кристаллизация. Это объясняется поглощением энергии при образовании интерметаллидов. Такое охлаждение создает условия для роста дендритов олова, которые занимают основную часть микроструктуры, пока итоговая концентрация растворенных веществ не начинает за-

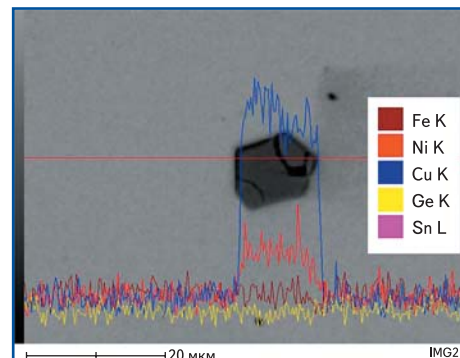


Рис. 6. Многогранная структура кристалла $(CuNi)_6Sn_5$ в SnCuNiGe-припое

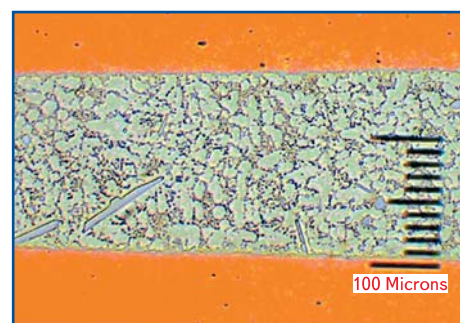


Рис. 7. Оловянные дендриты и пластинки Ag_3Sn , доминирующие над микроструктурой SnAgCu-припоя

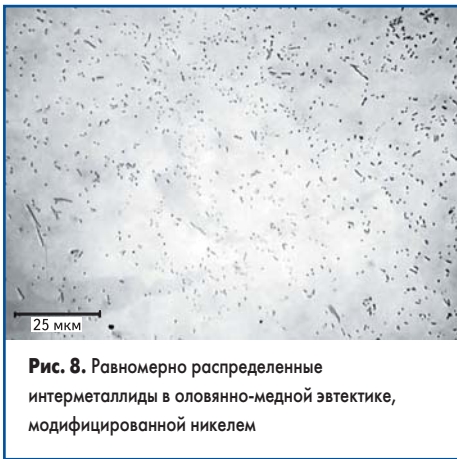


Рис. 8. Равномерно распределенные интерметаллиды в оловянно-медной эвтектике, модифицированной никелем

твердевать в виде псевдобинарной или троичной эвтектики с характерным очевидным разделением фаз. Беря за образец правильную структуру оловянно-свинцовых припоев, не имеющую дендритов, можно получить микроструктуру с отличным распределением при добавлении третьего компонента в оловянно-медные сплавы. Таким образом улучшаются свойства припоя. Есть качественные доказательства этого утверждения. Идеальная эвтектическая структура оловянно-свинцовых припоев огрубевает, если припой выдерживается при повышенной температуре. И если происходит реакция между оловом припоя и медной контактной площадкой, ее интенсивность заметно снижается из-за присутствия свинца. Другие элементы в данном процессе не задействованы. Интерметаллиды в бессвинцовых припоях более стабильны, но высокое содержание олова означает, что их рост сконцент-

рирован в области контакта. Если серебро ускоряет рост интерметаллидов в сплаве олова и меди, то никель, напротив, является ингибитором этого процесса. Хотя изначально слой интерметаллидов в сплаве SnCuNi толще, их рост происходит значительно медленнее, чем в других комбинациях. Это должно привести к более высокой надежности соединений.

Выбор бессвинцовых припоев

Приведенные выводы сложились у авторов в течение первых восьми лет массового коммерческого производства электроники с использованием бессвинцовых припоев, а также по итогам испытаний и разработок, проведенных для облегчения перехода на бессвинцовые припои. Для применения в изделиях, где в пайке могут образовываться напряжения растяжения или разрыва, или изделия могут быть подвергнуты ударным нагрузкам, рекомендуются пластичные припои с малым образованием интерметаллидов после пайки. Стабильность интерметаллических соединений на границе соединений и в глубине пайки оказывается особенно важной, если соединения испытывают большой нагрев, пропуская через себя большой ток. Текучесть припоя также является важным критерием при выборе. Она связана с эвтектическим поведением сплава, и результирующая чистая структура, свободная от первичных оловянных дендритов, положительно влияет на свойства сплава в качестве припоя. ■

Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале *EPP Europe* № 10 `2008, стр. 28.